

명세서

광섬유 브래그 격자 센서 시스템

기술분야

- [1] 본 발명은 광섬유 브래그 격자 센서 시스템에 관한 것으로서, 특히 파장 가변 레이저의 파장 안정성 및 반복성을 향상시키고, 편광 의존성이 있는 경우 이를 제거하여 정확성을 향상시킨 광섬유 브래그 격자 센서 시스템에 관한 것이다.

배경기술

- [2] 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating)는 광섬유 코아(core)에 축방향으로 주기적인 굴절률 변화를 유도한 것이다. 이 광섬유 격자는 브래그 조건을 만족하는 브래그 파장(Bragg wavelength) 중심으로 좁은 선폭(통상 0.1~1nm)의 빛만 반사하게 되고 나머지 파장의 빛은 통과시키는 특성을 가진다. 이 브래그 파장은 광섬유 브래그 격자의 온도가 변화하거나 응력(stress)이 인가되면 그에 따라 변화하게 된다. 따라서 이 성질을 이용해서 온도, 변형률(strain), 압력 등을 측정하는 많은 광섬유 격자 센서들이 개발되어 왔다.
- [3] 이러한 광섬유 격자 센서의 장점은 온도, 변형률과 같은 물리량의 절대값을 측정할 수 있다는 것이다. 또한 전자기파의 영향을 받지 않고, 광섬유 재질이 실리카(SiO_2) 계통이기 때문에 전기 절연체이며 크기가 작고 가벼워서 측정 대상 구조물의 기능에 영향을 주지 않고도 장착 및 삽입이 가능하고, 광섬유 자체로 광신호를 손실없이 먼 거리까지 전송할 수 있으므로 원격측정이 용이하다. 또 다른 장점은 많은 수의 격자 센서를 여러 장소에 장착해서 동시에 측정하는 다중화(multiplexing)가 용이하다는 점이다. 즉, 각 광섬유 격자는 서로 다른 반사 파장을 가지도록 설계하여 측정시 서로 파장이 겹쳐지지 않도록 하는 파장 분할 다중화(wavelength division multiplexing) 방식을 쉽게 적용할 수 있다. 이 방식을 적용해서 수 mm~수 십 km 떨어진 임의의 장소에 각 센서를 위치시킴으로써 준분포센서(quasi-distributed sensor)의 기능을 수행할 수 있다.
- [4] 광섬유 브래그 격자 센서 시스템을 구현하는 방법으로 처음 제안된 것은 광섬유 격자 파장을 선폭이 넓은 광원(broadband source)과 파장 가변 필터(wavelength tunable filter)를 사용하여 측정하는 것이었다[A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter", Optics Letters, Vol. 18, pp. 1370-1372, 1993]. 이 방법은 인가 전압을 변화시켜 파장 가변 필터의 파장을 광섬유 격자들의 파장 범위 이상으로 변화시킨다. 그리고, 인가 전압과 파장 가변 필터의 파장이 특정 관계를 가지고 있음을 이용하여 광섬유 격자 반사신호의 피크(peak)가 나타나는 때의 구동 전압을 측정함으로써 광섬유 격자들의 파장을

측정한다.

- [5] 다른 방법은 광원으로 파장 가변 레이저를 사용하였다[S. H. Yun, D. J. Richardson, and B. Y. Kim, "Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength-swept fiber laser", *Optics Letters*, Vol. 23, pp. 843-845, 1998]. 이 방법은, 먼저, 파장 가변 필터를 사용해서 레이저의 파장을 광섬유 격자들의 파장 범위 이상으로 시간에 따라 변화시키고, 시간과 레이저 파장은 특정 관계를 가지고 있음을 이용하여, 광섬유 격자 반사신호의 피크가 나타나는 때의 시간을 측정하여 광섬유 격자들의 파장을 측정하였다.
- [6] 그런데 상술한 두 가지 방법에서는 실제 사용된 파장 가변 필터의 파장이 인가 전압에 대해서 선형적으로 변하지 않고, 이력현상(hysteresis)과 주위 온도에 따라 필터의 파장이 변함으로 인하여 장시간 측정하면 정확도와 반복성이 떨어지는 문제점이 있다. 또한 그 두 가지 방법에서는 광섬유 브래그 격자 센서의 편광 의존성에 의한 오차 및 그 해결 방법에 대해서는 언급하지 않고 있다.
- [7] 따라서 고정밀, 고반복성의 브래그 파장 측정을 위해서는 상술한 문제를 해결할 수 있는 파장 기준(wavelength reference) 및 보상 방법이 요구되었으며, 후술하는 방법들이 개발되었다. 이하 그 원리 및 문제점을 살펴본다.
- [8] 도 1 내지 도 3은 광섬유 브래그 격자 센서 시스템의 정확성을 확보하기 위한 종래 기술들을 설명하기 위한 구성도이다. 도 1은 Kringlebotn 등이 제안하여 미국 특허 등록(등록번호 : 6,097,487호)된 기술이며, 도 2는 Bao 등이 제안하여 미국 특허 등록(등록번호 : 6,327,036호)된 기술이고, 도 3은 Bao 등이 제안하여 미국 특허 등록(등록번호 : 6,449,047호)된 기술이다.
- [9] 도 1을 참조하면, 미국 특허 6,097,487호에 개시된 기술에는, 광섬유 링(ring) 레이저가 광원(1)으로 사용되고, 레이저 공진기 안의 파장 가변 필터(2)를 사용하여 레이저의 파장을 변화시킨다. 이득 매질(3)은 파장 분할 다중기(wavelength division multiplexer, 4)를 통해 펌프 레이저 다이오드(5)로 펌핑된다. 광아이솔레이터(optical isolator, 6)는 레이저를 한 쪽 방향, 예컨대 반시계 방향으로만 발진시키기 위해서 사용된다. 파장이 변하는 좁은 선폭의 레이저 출력은 제1 커플러(coupler, 7)를 통하여 출력된 다음, 제2 커플러(8)에 의해서 두 갈래로 나누어진다. 제2 커플러(8)에서 출력된 광 중에서 일방향으로 출력된 광은 광섬유 격자(9)에서 반사된 다음 제1 광검출기(10)로 입력되고, 타방향으로 출력된 광은 패브리-페롯 필터(Fabry-Perot filter, 11)와 대역투과필터(optical bandpass filter, 12)를 거쳐서 제2 광검출기(13)로 입력된다. 제2 커플러(8)와 광섬유 격자(9) 사이에는 제3 커플러(14)가 설치된다. 광원(1)으로부터 출력된 광의 대부분은 제3 커플러(14)를 통하여 광섬유 격자

어레이(9)로 입사되고, 이 격자들 중 하나는 기준 격자로서 파장의 절대 기준이 된다.

- [10] 제1 및 제2 광검출기(10, 13)에서 검출된 신호의 처리 및 비교가 신호 처리부(16)에서 동시에 수행된다.
- [11] 상술한 바와 같이, 이 기술에서는 레이저 파장을 관측하기 위한 파장 기준 생성을 위해서 패브리-페롯 필터(11)와 기준 광섬유 격자(15)를 사용한다. 패브리-페롯 필터(11)는 등간격 주파수의 빛만 투과시키므로 이 주파수들을 파장 기준으로 사용한다. 즉, 패브리-페롯 필터(11)의 출력 신호를 관측하여 파장 가변 필터(2)의 파장, 즉 레이저 파장이 얼마나 변했는지 알 수 있다. 기준 광섬유 격자(15)는 절대 파장을 계산하기 위해서 사용된다. 앞의 패브리-페롯 필터(11)의 신호를 이용해서 상대적인 레이저 파장을 계산할 수 있지만, 절대적인 레이저 파장을 계산할 수는 없다. 따라서 기준 광섬유 격자(15)에서 반사된 피크의 위치를 측정하고, 이를 절대 기준 파장으로 삼아 레이저의 시간에 따른 절대 파장을 계산한다. 요약하면, 기준 광섬유 격자(15)와 패브리-페롯 필터(11)의 피크 신호를 이용해서 레이저 파장의 변화를 계산하고, 이 결과를 이용해서 광섬유 격자 센서들의 파장을 측정하는 방법이다.
- [12] 그런데, 상술한 방법의 단점은 기준 광섬유 격자(15)의 파장이 온도 등에 의해서 변화되면, 곧 파장 측정의 오차로 나타나게 된다는 점이다. 따라서 기준 광섬유 격자(15)가 외부환경 변화에 무관하도록 온도 안정화 등을 해야만 한다.
- [13] 도 2를 참조하면, 미국 특허 6,327,036호에 개시된 기술에는, 기준 파장을 생성하기 위해서 도 1의 경우와 마찬가지로 기준 광섬유 격자(1)와 패브리-페롯 필터(2)를 사용한다. 그러나 이 방법에서는 기준 광섬유 격자(1)의 파장을 패브리-페롯 필터(2)의 특정 투과 파장과 일치시켜서, 그 특정 파장을 더 키우거나 없애는 방법으로 다른 패브리-페롯 피크 파장들과 구별되게 하는 수단을 추가로 제시하였다. 이렇게 구별된 특정 파장을 절대 파장 기준으로 사용한다. 이 방법을 이용해서 입력 광원, 즉 제1 광원(3)의 파장 변화를 정밀하게 측정할 수 있었다. 그러나 이 방법은 기준 파장 생성을 위해서 추가의 광원, 즉 제2 광원(4)이 필요한 단점을 가진다. 또한, 이 방법은 광 스위치(5)와 스플리터(6)를 이용하여 한번은 제2 광원(4)에서 출력된 빛을 패브리-페롯 필터(1)와 기준 광섬유 격자(2)와 대역투과필터(7)를 통과시킨 후 파장 가변 필터(8)를 사용하는 파장 스캐너(scanner, 9)에 입사시켜 기준 파장을 생성하고, 한번은 제1 광원(3)에서 발생된 빛을 스캐너(9)에 입사시켜 파장을 측정하는 시분할 방식을 사용한다. 따라서 이 방법은 시분할 방식을 이용한 파장 기준의 생성으로 인하여 실제 입력 신호의 파장 정보 취득 속도에 제한이 발생하는 단점이 있다.

- [14] 도 3을 참조하면, 미국 특허 6,449,047호에 개시된 기술에는, 기준 파장을 생성하기 위해서 도 2와 마찬가지로 기준 광섬유 격자(1)와 패브리-페롯 필터(2)를 사용하고, 기준 광섬유 격자(1)의 파장을 패브리-페롯 필터(2)의 특정 투과 파장과 일치시키는 방법을 사용한다. 그러나 광원(3)으로는 빠른 속도로 파장이 변화되는 레이저를 사용하며, 파장을 변화시키기 위해서 전압으로 투과 파장이 조절되는 파장 가변 필터를 사용했다. 레이저 출력의 일부는 제1 커플러(4)를 지나 패브리-페롯 필터(2)와 기준 광섬유 격자(1)를 순차적으로 통과하여 제1 광검출기(5)에 입사된다. 신호 처리부(6)에서 제1 광검출기(5)의 신호를 분석하여 레이저의 파장을 계산한다. 그리고, 레이저 출력의 대부분은 제1 및 제2 커플러(4, 5)를 순차적으로 거쳐 광섬유 격자 센서 어레이(7)로 입사된다. 광섬유 격자 센서 어레이(7)에서 반사된 신호들은 제2 광검출기(8)에 입사되며, 이 신호들을 제1 광검출기(5)로 입사된 신호와 비교하여 광섬유 격자 어레이(7)의 반사 파장을 신호 처리부(6)에서 계산한다. 이 방법을 이용해서 전 파장 영역에서의 비선형성을 제거할 수 있으며, 정확성도 확보할 수 있다. 여기서, 정확성이란 센서로 측정된 파장과 실제 파장의 차이를 나타낸다.
- [15] 도 1 내지 도 3에 도시된 종래 기술들은 기준 파장을 생성하고, 그 기준 신호를 이용해서 광원의 파장을 지속적으로 관측하여 광섬유 격자 센서 시스템의 정확성을 향상시키는 방법에 관한 것들이다.
- [16] 그런데, 광섬유 브래그 격자, 패브리-페롯 필터, 광검출기 등에서는 측정 정확성에 문제를 일으키는 큰 요인 중의 하나인 편광 의존성이 발생할 수 있다. 특히 광섬유 격자 자체의 편광 의존성은 변형률 측정에 큰 오차를 발생시킨다. 광섬유 격자의 편광 의존성이란 격자에 입사되는 빛의 편광에 따라 반사 파장이 달라지는 현상을 말한다. 광섬유 격자에 내부 복굴절이나 또는 외부 영향에 의해서 복굴절이 유도되면 이 현상이 발생하게 된다. 유도 복굴절을 일으키는 요인은 횡방향 응력(transverse stress), 광섬유의 굽힘(bending) 등이 있다. 실제 광섬유 격자 센서 시스템에서는 빛을 광섬유를 이용해서 수 km 이상 전송해야 하는데 주위 환경 변화에 따라 빛의 편광 상태가 무작위적으로 변화된다. 따라서 편광에 따라 반사 파장이 변화되어 측정에 오차가 생기게 된다. 이를 해결하기 위해서 광섬유 격자가 횡방향 응력을 받지 않는 패키징(packaging)을 하거나, 편광 유지 광섬유 등을 이용하여 편광 상태를 유지하는 방법도 가능하지만, 가격이 비싸고 비효율적이다. 이 문제를 효율적으로 해결하기 위해서 다음의 방법이 개발되었다.
- [17] 도 4는 Yamate 등이 미국 특허 등록(등록번호 : 6,363,180호)한 편광 의존성을 줄여서 횡방향 변형률을 안정하게 측정하는 방법을 설명하기 위한 구성도이다.
- [18] 도 4를 참조하면, 미국 특허 6,363,180호에 개시된 기술은, 횡방향 변형률을

측정하는 경우에 편광에 따라 브래그 격자의 반사 파장이 서로 달라지는 성질을 이용한다. 광섬유 격자에 횡방향(수직 방향)의 응력이 인가되면 복굴절이 유도되고, 그에 따라 두 개의 반사 피크가 나타난다. 즉 각 고유 편광에 해당하는 두 개의 피크를 만들며 두 피크의 간격은 횡방향 응력의 크기에 비례한다. 그런데, 이러한 측정에서는 입력 편광 상태가 변화되거나 또는 광신호를 검출하는 장치가 편광 의존성이 있는 경우 안정한 신호를 얻을 수 없다. 따라서, 본 방법에서는 센서(1)에 입사되는 광원(2)의 편광을 편광기(3)와 조절기(4)를 사용하여 조정하거나, 센서(1)에서 반사되어 커플러(5)를 통하여 광검출부(6)에 입사되는 빛의 편광을 편광 회전기(7)로 조절해서 센서의 성능을 향상시켰다. 광검출부(6)는 레코더(8)와 파장가변필터(9)를 포함한다. 또한 센서의 반사 파장을 분석하기 위한 패브리-페롯 필터는 편광 의존성을 가지고 있어서, 편광 스크램블러(10)를 사용하여 편광 의존성을 제거함으로써 측정 시스템의 오차를 줄일 수 있었다.

- [19] 하지만 편광조절기나 편광 스크램블러를 사용하는 경우에는 충분한 시간을 두고 측정하여 평균화시켜야 편광 의존성 제거 효과를 나타낼 수 있으므로 고속으로 측정해야 할 경우에는 가격이 비싼 고속 편광 스크램블러를 이용해야 하고, 삽입손실이 증가하는 등의 단점이 있다.

- [20] 따라서, 실제 상용화가 가능한 광섬유 브래그 격자 센서 시스템을 제작하기 위해서는 파장 안정성과 편광 의존성 문제를 해결해야만 한다.

도면의 간단한 설명

- [21] 도 1 내지 도 4는 종래기술에 따른 광섬유 브래그 격자 센서 시스템의 구성도.

- [22] 도 5 내지 도 10은 본 발명에 따른 실시예들을 설명하기 위한 도면.

발명의 상세한 설명

기술적 과제

- [23] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 광원으로 사용되는 파장 가변 레이저의 파장을 관측 및 계산 할 뿐만 아니라 그 결과를 이용해서 광원의 파장을 능동적으로 제어하는 광섬유 브래그 격자 센서 시스템을 제공하는 데 있다.

- [24] 본 발명이 이루고자 하는 다른 기술적 과제는 변형을 측정에 있어서 발생될 수 있는 편광 의존성 문제를 동시에 해결하는 광섬유 브래그 격자 센서 시스템을 제공하는 데 있다.

기술적 해결방법

- [25] 상기 기술적 과제를 달성하기 위한 본 발명에 따른 광섬유 브래그 격자 센서 시스템은 파장 가변 필터를 포함하며 가변 파장의 광을 출력하는 파장 가변 레이저; 파장 가변 레이저로부터 출력된 광을 입력받아 두 방향으로 분기시키는

제1 커플러; 제1 커플러에 의해 분기된 광 중에서 일방향으로 출력된 광을 입력받아 파장 가변 레이저에서 출력된 광의 파장을 실시간으로 측정하기 위한 기준 파장들을 생성하며, 기준 파장들 중에서 어느 한 파장을 절대 기준 파장으로 표시하는 기준 파장 생성부; 제1 커플러로부터 출력된 광 중에서 타방향으로 출력된 광을 입력받아 파장별로 각각 반사하는 광섬유 브래그 격자 어레이; 광섬유 브래그 격자 어레이로부터 반사된 각각의 광이 검출되는 시간을 측정하는 광섬유 격자 파장 감지부; 기준 파장 생성부로부터 생성된 기준 파장들의 시간과 광섬유 격자 파장 감지부로부터 광이 검출된 각각의 시간을 입력받아, 파장 가변 레이저에서 출력된 광들의 시간대별 파장을 파악하고 광섬유 격자 파장 감지부로부터 검출된 광 각각의 파장을 구하는 신호 처리부와; 파장 가변 레이저의 출력 파장이 주기적으로 변화되도록 파장 가변 필터에 교류 전압을 인가하고, 신호 처리부로부터 파장 가변 레이저에서 출력된 광들의 시간대별 파장에 대한 데이터를 입력받아 시간대별 파장이 일정하게 반복되도록 파장 가변 필터에 직류 전압을 인가하는 레이저 파장 제어 피드백부가 구비되는 것을 특징으로 한다.

발명의 실시를 위한 최선의 형태

- [26] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예들을 설명한다.
- [27] 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 브래그 격자 센서 시스템을 설명하기 위한 구성도이고, 도 6은 도 5에 따른 광섬유 브래그 격자 센서 시스템에서 파장 가변 레이저를 설명하기 위한 구성도이며, 도 7는 도 5에 따른 광섬유 브래그 격자 센서 시스템에서 기준 파장 생성부를 설명하기 위한 구성도이고, 도 8은 도 5에 따른 광섬유 브래그 격자 센서 시스템에서 레이저 파장 제어 피드백부를 설명하기 위한 구성도이다.
- [28] 도 5를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 브래그 격자 센서 시스템은 파장 가변 레이저(100), 기준 파장 생성부(300), 광섬유 브래그 격자 어레이(400), 광섬유 격자 파장 감지부(500), 신호 처리부(600), 레이저 파장 제어 피드백부(700), 파장 가변 레이저(100)로부터 출력된 광을 입력받아 기준 파장 생성부(300)쪽과 광섬유 브래그 격자 어레이(400)쪽으로 분기시키는 제1 커플러(210), 제1 커플러(210)에서 출력된 광이 광섬유 브래그 격자 어레이(400)에 전달되도록 하고 광섬유 브래그 격자 어레이(400)에서 반사된 광이 광섬유 격자 파장 감지부(500)에 전달되도록 하는 제2 커플러(220)를 포함하여 이루어진다.
- [29] 도 5와 도 6을 참조하면, 파장 가변 레이저(100)는 이득 매질을 펌핑하기 위한 레이저 다이오드(110), 레이저 다이오드(110)로부터 출력된 광을 이득 매질에 입사시키기 위한 파장 분할 다중기(120), 이득 매질로 사용되는 어븀첨가

광섬유(130), 투과 파장을 주기적으로 스캔하여 레이저 파장을 가변시키는 파장 가변 필터(140)를 포함하여 이루어진다.

- [30] 즉, 이득 매질로 사용된 어븀첨가 광섬유(130)는 파장 분할 다중기(120)를 통해 펌프 레이저 다이오드(110)로 펌핑된다. 도 6은 순방향 펌핑(forward pumping)을 도시하고 있지만, 역방향 펌핑(backward pumping)도 가능하다. 레이저의 파장은 파장 가변 필터(140)의 투과 파장에 의해서 결정된다. 본 실시예에서는 파장 가변 필터(140)로서 파장 가변 패브리-페롯 필터를 사용하는데, 이 필터의 투과 파장은 인가 전압에 따라 변화된다. 즉, 인가 전압을 시간에 따라 변화시켜 레이저 파장을 가변시킨다. 레이저를 한 쪽 방향, 예컨대 반시계 방향으로만 발진시키기 위해서 두 개의 광아이솔레이터(151, 152)를 사용한다. 레이저는 커플러(160)를 통해서 출력되며, 커플러(160) 출력단에 광아이솔레이터(153)를 추가로 설치하여 레이저 출력이 레이저 공진기로 다시 입사되는 것을 방지한다.
- [31] 본 레이저 출력의 특성은 파장이 시간에 따라 주기적으로 가변된다는 점이다. 파장 가변 범위는 사용된 어븀첨가 광섬유(130)와 파장 가변 필터(140)에 의해서 결정되는데 통상 40nm, 예컨대 1525~1565 nm, 이상이다. 또한 펌핑 세기와 파장을 가변 시키는 전압의 주파수와 크기를 적절히 조절하면 레이저 출력을 모드록킹(mode-locking)시킬 수 있다. 모드록킹이 되면 레이저 선폭이 파장 가변 필터(140)의 선폭과 비슷한 값을 가지는 레이저 출력을 얻을 수 있는데, 이는 광섬유 격자 측정 시스템의 편광 의존성을 해결하는데 중요한 역할을 하게 된다.
- [32] 상기한 레이저를 실제 광섬유 격자 측정 시스템에 사용하기 위해서는 파장 안정성을 확보해야 한다. 그러나 파장을 변화시키기 위해서 사용되는 파장 가변 필터들은 통상 온도 의존성, 이력현상 등에 의해서 투과 파장이 변화되며, 이는 레이저 출력 파장에 오차를 주게 된다. 따라서 레이저 파장을 실시간으로 측정할 수 있는 방법과, 더 나아가서 이 측정 정보를 이용해서 레이저 파장 변화를 능동적으로 제어할 수 있는 피드백 방법이 요구되는 데, 이를 위해서 본 발명에서는 기준 파장 생성부(300), 신호 처리부(600), 및 레이저 파장 제어 피드백부(700)를 사용하였다. 이에 대해서 후술한다.
- [33] 도 5와 도 7을 참조하면, 기준 파장 생성부(300)는 제1 커플러(210)에 의해 분기된 광 중에서 일방향으로 출력된 광을 입력받아 파장 가변 레이저(100)에서 출력된 광의 파장을 실시간으로 측정하기 위한 기준 파장을 생성하고, 기준 파장들 중에서 어느 한 파장을 절대 기준 파장으로 표시하기 위하여 기준 광섬유 격자(310), 패브리-페롯 필터(320), 및 광검출기(330)를 포함한다. 기준 파장은 다음과 같이 생성된다.
- [34] 패브리-페롯 필터(320)는 등간격 주파수를 가지는 빛만 투과시키고, 기준

광섬유 격자(310)는 특정 파장의 빛만 반사시킨다. 따라서 시간에 따라 파장 또는 주파수가 변하는 레이저 출력이 기준 광섬유 격자(310)를 통과하면 도 7의 (2)의 상측에 도시된 바와 같은 신호가 나타나고, 패브리-페롯 필터(320)를 통과하면 도 7의 (2)의 하측에 도시된 바와 같은 기준 파장 신호가 나타난다. 이 때 기준 광섬유 격자(310)의 반사 파장을 패브리-페롯 필터(320)의 투과 파장(λ_a)과 일치시켜서 그 피크를 사라지게 하고, 사라진 피크 다음 피크의 파장(λ_b)을 절대 파장의 기준으로 사용한다. 그러면 광검출기(330)에서 검출된 신호는 기준 광섬유 격자(310)와 패브리-페롯 필터(320)를 통과한 신호의 곱으로 나타나는데, 이를 관측하면 현재 레이저 파장이 어떻게 변화되고 있는지 알 수 있다. 즉 기준 광섬유 격자(310)를 이용해서 절대 파장 기준을 정하고, 패브리-페롯 필터(320)의 파장(또는 주파수) 피크들의 시간을 내삽하여 모든 시간에서 레이저 파장 정보를 구해낸다. 파장을 구하기 위해서 인접한 두 피크의 시간을 내삽하므로, 주파수 간격이 좁을수록 파장 변화의 비선형성을 줄일 수 있다. 이 간격은 패브리-페롯 필터의 에탈론(etalon) 간격에 의해서 결정되는 데, 본 실시예에서는 100 GHz(0.8nm @ 1550nm) 또는 50 GHz(0.4nm @ 1550nm)를 사용하였다.

[35] 그런데, 본 발명의 실시예에서도 기준 광섬유 격자와 패브리-페롯 필터의 온도 의존성이 파장 측정 오차를 유발할 수도 있으므로, 그 오차를 줄이기 위해서 기준 광섬유 격자(310)는 온도 안정화 패키징된 것을 사용하며, 반사 파장의 선포이 0.4 nm 정도로 넓고 평평하게 처리된 것을 사용한다. 이러한 광섬유 격자를 사용하게 되면 온도 의존성이 작고 반사 대역이 넓으므로 주위 온도가 변해도 파장 λ_a 의 피크를 계속해서 사라지게 할 수 있다. 또한, 패브리-페롯 필터(320)도 에탈론을 진공 또는 공기로 구성함으로써 온도 의존성을 줄이고, 분산 효과를 줄이는 것이 바람직하다. 나아가, 좀더 높은 신뢰성을 확보하기 위해서 패브리-페롯 필터(320)의 온도를 일정하게 유지하는 것도 한 방법이다. 한편, 도 7에 도시된 기준 광섬유 격자(310)와 패브리-페롯 필터(320)의 위치를 바꾸어도 본 실시예에서 구현하고자 하는 목적에는 영향을 미치지 않는다.

[36] 다시 도 5를 참조하면, 광섬유 브래그 격자 어레이(400)는 제1 커플러(210)로부터 출력된 광 중에서 타방향으로 출력된 광을 입력받아 파장별로 각각 반사하며, 광섬유 격자 파장 감지부(500)는 광섬유 브래그 격자 어레이(400)로부터 반사된 각각의 광을 각각 검출하고, 각각의 광이 검출되는 시간을 측정한다. 따라서, 광섬유 격자 파장 감지부(500)는 광검출기와 그 광검출기에서 검출한 신호로부터 반사 피크의 시간을 구하는 회로로 구성된다. 본 실시예에서는 피크의 시간을 구하기 위해서 반사 피크의 최대값의 특정 비율이 되는 두 점을 평균하는 방법을 사용했다. 이 방식을 이용하여 피크의

시간을 계산하면 레이저 출력 또는 광섬유 브래그 격자 어레이로부터 반사되는 신호의 크기가 변화되거나 브래그 격자의 반사폭이 넓을 경우에 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있다.

[37] 신호 처리부(600)는 기준 파장 생성부(300)로부터 측정된 기준 파장들이 검출된 시간과 광섬유 격자 파장 감지부(500)로부터 광이 검출된 각각의 시간을 입력받아, 파장 가변 레이저(100)에서 출력된 광들의 시간대별 파장을 파악하고, 그 시간대별 파장과 광섬유 격자 파장 감지부(500)로부터 입력된 시간을 비교하여 광섬유 격자 파장 감지부(500)로부터 검출된 광 각각의 파장을 구한다.

[38] 도 5와 도 8을 참조하면, 레이저 파장 제어 피드백부(700)는 교류 전압, 즉 삼각파를 파장 가변 필터에 인가하여 파장 가변 레이저(100)의 출력 파장을 주기적으로 변화시키고, 파장 가변 레이저(100)에서 출력된 광들의 시간대별 파장에 대한 데이터를 신호 처리부(600)로부터 입력받아 주의 환경 변화에 상관없이 시간대별 파장이 일정하게 반복되도록 파장 가변 필터에 인가되는 직류 전압을 조절한다.

[39] 삼각파를 생성하기 위해서 삼각파 발생기(710)를 사용한다. 삼각파의 크기는 파장 변화 범위, 주파수는 파장 변화 속도를 결정한다. 삼각파의 크기가 증가하는 구간, 예컨대 레이저 파장이 증가하는 구간에서 파장 측정이 수행되고, 감소하는 구간에서는 신호 처리 및 레이저 파장 제어 피드백이 수행된다. 상술한 바와 같이 일정한 삼각파가 파장 가변 필터에 인가되어도, 필터의 온도 특성과 이력현상에 의해서 파장 변화의 범위가 변하므로, 레이저 파장 변화를 능동적으로 제어할 수 있는 피드백이 요구된다.

[40] 본 발명에서는 레이저 파장의 제어를 위하여 파장을 변화시키는 삼각파 이외에 기준 파장 생성부 및 신호 처리부의 정보를 이용하여 직류 보상 전압을 추가로 인가하였다. 즉, 삼각파와 피드백용 보상 전압을 파장 가변 필터에 인가함으로써 주위 환경 변화에 무관하게 일정한 파장이 출력되도록 능동적으로 파장을 제어한다. 그 제어 피드백은 다음과 같다.

[41] 먼저, 삼각파의 크기가 증가하는 구간에서 기준 파장 생성부(300)로부터 측정된 파장들 중에서 절대 기준 파장(λ_b)의 피크 시간(T_1)을 측정하고, 이를 저장한다. 그리고, 사용자가 절대 기준 파장을 위치시키고자 하는 설정 시간(T_0)과 측정된 절대 기준 파장의 피크 시간(T_1)의 차(ΔT)를 감산기(720)를 이용해서 구한다. 감산기(720)에서 구해진 현 주기에서의 시간의 차(ΔT)와 전 주기에서의 시간의 차($\Delta T'$)를 제1 가산기(730)로 더해서 피드백의 에러 신호로 사용하고, 이 에러 신호에 비례하는 보상 전압을 디지털 아날로그 변환기(740)로 생성한다. 즉, 보상 전압은 절대 기준 파장이 위치하는 시간을 일정하게 유지해줄 수 있도록 생성된다. 그 보상 전압을 삼각파의 크기가 감소하는 구간에서 출력시키고,

출력된 보상 전압과 삼각파를 제2 가산기(750)로 합쳐서 파장 가변 필터에 인가할 신호를 생성한다. 이 방식을 사용하면 실시간으로 레이저 파장을 조절할 수 있다.

- [42] 상술한 본 발명에 따른 광섬유 브래그 격자 센서 시스템을 종래기술과 비교하면 레이저 파장을 실시간으로 측정 및 계산할 뿐만 아니라, 그 파장 정보를 이용해서 능동적으로 레이저 파장을 조정할 수 있다. 따라서, 주위 환경이 변화되어 레이저 출력 및 파장이 불안정해지거나, 파장 가변 필터의 투과 파장이 자유 분광 영역(free spectral range) 밖으로까지 변화되어 레이저 파장이 단조 증가하지 못하고 갑자기 변화되는 것을 억제 할 수 있는 장점이 있다. 즉, 레이저 파장 자체를 항상 안정화시켜 줌으로써 장기간의 측정에 매우 효과적이다.
- [43] 도 9는 상술한 본 발명에 따른 광섬유 브래그 격자 센서 시스템을 이용해서 광섬유 격자의 파장을 측정한 그래프이다. 측정시에 광섬유 격자를 외부와 차단하여 파장이 변화되지 않도록 하였다.
- [44] 도 9를 참조하면 22시간 이상 장시간 측정하였음에도 안정적으로 신호가 관측되었다. 즉, 잡음(분해능)은 1 pm 이하이며, 드리프트(drift)는 3 pm 이하였다. 따라서, 본 발명에 의하면 수 pm 수준의 정확성을 가지는 광섬유 브래그 격자 센서 시스템을 구현할 수 있다. 또한 본 발명의 파장 가변 레이저는 수 mW 이상으로 광세기가 크므로 출력을 분기해서 여러 광섬유 격자 센서 어레이를 측정하도록 확장하기가 용이하다. 이를 위해서 도 5의 구성에서 제2 커플러(220)를 다채널 스플리터(splitter)로 대체하고, 각 광섬유 격자 센서 어레이마다 광섬유 격자 파장 감지부(500)를 각각 별도로 연결하면, 수백개 이상의 광섬유 격자 센서를 동시에 측정할 수 있다.
- [45] 이하에서 도 5를 참조하여 상술한 광섬유 브래그 격자 센서 시스템의 작동을 요약한다.
- [46] 파장 가변 레이저(100)에서 출력된 광은 제1 커플러(210)에서 분기되고 제1 커플러(210)에 의해 분기된 광 중에서 일방향으로 출력된 광이 기준 파장 생성부(300)로 입력되면, 기준 파장 생성부(300)에서는 주기적인 기준 파장들 및 절대 기준 파장을 생성하고, 신호 처리부(600)는 기준 파장 생성부(300)로부터 신호를 입력받아 파장 가변 레이저(100)에서 출력된 광들의 시간대별 파장을 파악하고, 그 시간대별 파장이 항상 일정하도록 레이저 파장 제어 피드백부(700)에서 파장 가변 레이저(100)의 파장을 안정화시킨다.
- [47] 그리고, 제1 커플러(210)에 의해 분기된 광 중에서 타방향으로 출력된 광은 광섬유 브래그 격자 어레이(400)에서 파장별로 반사되고, 그 반사된 광들은 광섬유 격자 파장 감지부(500)에서 파장별로 검출된 시간이 측정되고, 그 시간은

신호 처리부(600)로 입력되어 파장으로 환산되어 측정하고자 하는 물리량으로 변환되게 된다.

- [48] 한편, 상술한 본 발명의 광섬유 브래그 격자 센서 시스템에서도 편광 의존성이 나타날 수 있다. 이하에서 이를 제거하기 위한 실시예들을 설명한다.
- [49] 도 10은 광섬유 격자에 횡방향 응력이나 굽힘이 발생해서 복굴절이 유도된 경우 편광에 따라 반사 파장이 달라지는 것을 측정한 그래프이다.
- [50] 도 10을 참조하면 횡방향 응력이 가해지지 않으면 도 10의 (1)과 같이 하나의 피크만이 측정되지만, 횡방향 응력의 가해지면 도 10의 (2)와 같이 피크가 갈라지게 된다. 즉, 횡방향 응력이 가해지면 빛의 입력 편광에 따라 각 반사 피크의 크기와 형상이 변화되어 파장 측정의 오차를 증가시키게 된다. 이는 축방향 변형률을 측정하는 경우 원치 않는 횡방향 응력이 가해지면 오차가 발생됨을 의미한다.
- [51] 따라서 본 발명의 실시예에서는 편광 의존성을 제거하기 위해서 레이저 출력을 무편광화시키는 방법을 사용했다.
- [52] 레이저 출력을 무편광화시키는 방법은 크게 두 가지가 있다. 첫번째 방법은, 도 5 또는 도 6에 따른 파장 가변 레이저의 출력단에 편광 스크램블러를 설치하여 시간에 따라 편광을 무작위적으로 변화시키는 것이다. 광섬유 격자 파장의 측정은 충분한 시간 동안의 편광에 대한 평균으로 오차를 줄인다. 이 방법의 단점은 능동소자인 스크램블러를 사용하는 점, 스크램블러 자체에 속도의 한계가 있어 파장 측정 속도가 제한적이라는 점이다. 두번째 방법은 도 5 또는 도 6에 따른 파장 가변 레이저의 출력단에 무편광기(depolarizer)를 설치하는 것이다. 이는 레이저 출력을 무편광화시킴으로써 편광에 무관하게 파장을 측정하는 방법이다. 단순한 무편광기는 길이 비율이 1:2인 편광 유지 광섬유 두 조각을 45° 로 접합시켜서 만들 수 있다. 이 때에는, 요구되는 고가의 편광 유지 광섬유 길이가 파장 선포에 반비례하므로 레이저 출력의 파장 선포가 넓어야 한다.
- [53] 상술한 두 가지 방법 중에서 무편광기를 사용하는 방법이 선호되는데, 이유는 수동 소자이므로 전력을 공급할 필요가 없고 속도에도 제한이 없기 때문이다. 그러나 광섬유 브래그 격자 센서 시스템에 사용되는 일반적인 파장 가변 레이저는 파장 선포가 수 백 kHz 이하로 매우 좁다. 즉 파장 분해능이 우수하여 측정 범위를 작은 단위로 쪼갤 수는 있지만 무편광기를 사용하기에는 부적절하다. 그러나 본 발명에 사용되는 광섬유 파장 가변 레이저를 이용하면 $0.1 \sim 0.5\text{nm}$ 의 순간 파장 선포를 가지는 모드록킹된 안정한 광출력을 얻을 수 있으므로, 무편광기를 사용할 수 있으며 선포도 너무 넓지 않아 파장 분해능도 확보할 수 있는 장점이 있다.

- [54] 본 발명은 상술한 특정 실시예를 통해서 설명되었지만, 그 실시예에만 국한되지 않고 당 분야의 전문가들에 의하여 여러 형태로 변화되거나, 특정 소자를 생략 또는 추가시켜 구성할 수 있음은 자명하다.

산업상 이용가능성

- [55] 상술한 바와 같이 본 발명에 따른 광섬유 브래그 격자 센서 시스템에 의하면, 레이저 파장을 실시간으로 측정 및 계산할 뿐만 아니라, 그 파장 정보를 이용해서 능동적으로 레이저 파장을 조정할 수 있어 파장 안정성에 따른 측정 정확성이 향상되고, 편광 의존성 문제가 해결되어 광섬유 브래그 격자 센서의 실용화가 가능하다.
- [56] 그 예로써, 원자력 발전소, 도로, 교량, 댐과 같은 대형구조물의 안전진단과 항공기, 로켓 발사체, 인공위성 같은 기계구조물의 이상 유무 판단 및 구조 분석에 사용될 수 있으며, 학문적으로는 보다 세밀한 분석이 가능하므로 새로운 구조와 기존 구조의 문제점을 연구하는 데 활용될 수 있다. 즉, 본 발명의 광섬유 브래그 격자 분석 시스템은 기존의 구조안전진단 센서들을 대체할 것으로 예상된다.
- [57] 한편, 본 발발명의 광원은 출력의 세기가 크므로 많은 수의 광섬유 격자를 동시에 측정할 수 있는 장점이 있다.

청구의 범위

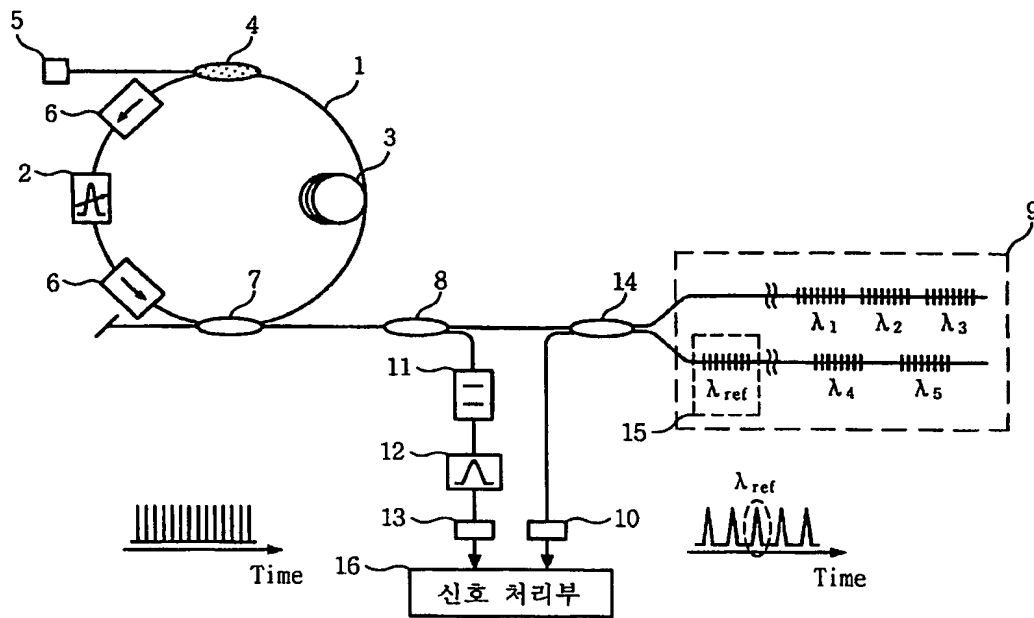
- [1] 파장 가변 필터를 포함하며 가변 파장의 광을 출력하는 파장 가변 레이저;
 상기 파장 가변 레이저로부터 출력된 광을 입력받아 두 방향으로
 분기시키는 제1 커플러;
 상기 제1 커플러에 의해 분기된 광 중에서 일방향으로 출력된 광을
 입력받아 상기 파장 가변 레이저에서 출력된 광의 파장을 실시간으로
 측정하기 위한 기준 파장들을 생성하며, 상기 기준 파장들 중에서 어느 한
 파장을 절대 기준 파장으로 표시하는 기준 파장 생성부;
 상기 제1 커플러로부터 출력된 광 중에서 타방향으로 출력된 광을
 입력받아 파장별로 각각 반사하는 광섬유 브래그 격자 어레이;
 상기 광섬유 브래그 격자 어레이로부터 반사된 각각의 광이 검출되는
 시간을 측정하는 광섬유 격자 파장 감지부;
 상기 기준 파장 생성부로부터 생성된 기준 파장들의 시간과 상기 광섬유
 격자 파장 감지부로부터 광이 검출된 각각의 시간을 입력받아, 상기 파장
 가변 레이저에서 출력된 광들의 시간대별 파장을 파악하고 상기 광섬유
 격자 파장 감지부로부터 검출된 광 각각의 파장을 구하는 신호 처리부;
 상기 파장 가변 레이저의 출력 파장이 주기적으로 변화되도록 상기 파장
 가변 필터에 교류 전압을 인가하고, 상기 신호 처리부로부터 상기 파장
 가변 레이저에서 출력된 광들의 상기 시간대별 파장에 대한 데이터를
 입력받아 상기 시간대별 파장이 일정하게 반복되도록 상기 파장 가변
 필터에 직류 전압을 인가하는 레이저 파장 제어 피드백부
 를 포함하는 광섬유 브래그 격자 센서 시스템.
- [2] 제 1항에 있어서, 상기 파장 가변 레이저는
 펄스광을 출력하는 레이저 다이오드;
 상기 레이저 다이오드로부터 출력된 광을 이득 매질에 입사시키는 파장
 분할 다중기;
 이득 매질로 사용되는 어븀첨가 광섬유; 및
 상기 교류 전압을 인가 받아 투과 파장을 주기적으로 스캔하여 레이저
 파장을 가변시키는 파장 가변 필터
 를 포함하는 파장 가변 광섬유 레이저인 것을 특징으로 하는 광섬유 브래그
 격자 센서 시스템.
- [3] 제 2항에 있어서, 상기 파장 가변 레이저의 출력은
 상기 파장 가변 필터에 인가되는 교류 전압의 크기와 주파수를 조절하여
 모드록킹되는 것을 특징으로 하는 광섬유 브래그 격자 센서 시스템.

- [4] 제 1항에 있어서, 상기 기준 파장 생성부는
패브리-페롯 필터;
기준 광섬유 격자; 및
광검출기를 포함하되, 상기 기준 광섬유 격자의 반사 파장을 상기
패브리-페롯 필터를 통과하는 어느 한 파장과 일치시켜 그 피크를 사라지게
하고, 그 사라진 피크의 다음 피크를 절대 기준 파장으로 사용하는 것을
특징으로 하는 광섬유 브래그 격자 센서 시스템.
- [5] 제 4항에 있어서, 상기 기준 광섬유 격자는
온도 안정화 패키징되고, 반사 파장의 선평이 넓고 평평하게 처리되는 것을
특징으로 하는 광섬유 브래그 격자 센서 시스템.
- [6] 제 4항에 있어서, 상기 패브리-페롯 필터는
에탈론이 진공 또는 공기로 구성되는 것을 특징으로 하는 광섬유 브래그
격자 센서 시스템.
- [7] 제 4항에 있어서, 상기 패브리-페롯 필터는
온도가 일정하게 유지되는 것을 특징으로 하는 광섬유 브래그 격자 센서
시스템.
- [8] 제 1항에 있어서, 상기 제1 커플러; 복수 개의 상기 광섬유 브래그 격자
어레이; 및 상기 광섬유 브래그 격자 어레이와 일대일 대응되는 복수 개의
상기 광섬유 격자 파장 감지부는 다채널 스플리터에 의하여 광학적으로
연결되는 것을 특징으로 하는 광섬유 브래그 격자 센서 시스템.
- [9] 제 1항에 있어서, 상기 파장 가변 레이저 출력단에는
무편광기가 더 설치되는 것을 특징으로 하는 광섬유 브래그 격자 센서
시스템.
- [10] 제 9항에 있어서, 상기 무편광기는 45°로 접합되고 길이 비율이 1:2인 두
편광 유지 광섬유 두 조각을 포함하는 광섬유 브래그 격자 센서 시스템.
- [11] 제 1항에 있어서, 상기 파장 가변 레이저는
출력단에 편광 스크램블러를 추가로 구비하는 것을 특징으로 하는 광섬유
브래그 격자 센서 시스템.
- [12] 제 1항에 있어서, 상기 직류 전압은
상기 절대 기준 파장이 위치하는 시간이 일정하게 유지되도록 인가되는
것을 특징으로 하는 광섬유 브래그 격자 센서 시스템.

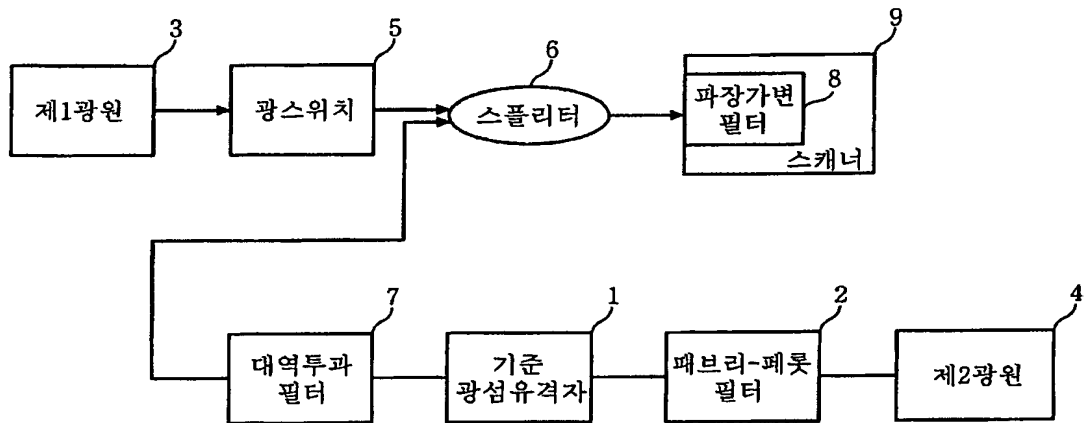
요약서

본 발명은 광섬유 브래그 격자 센서 시스템에 관하여 개시한다. 본 발명에 의한 시스템은 파장 가변 레이저; 파장 가변 레이저로부터 출력된 광을 두 방향으로 분기시키는 커플러; 커플러로부터 일방향으로 출력된 광을 입력받아 파장을 실시간으로 측정하기 위한 기준 파장들 및 절대 기준 파장을 생성하는 기준 파장 생성부; 커플러로부터 타방향으로 출력된 광을 입력받아 파장별로 각각 반사하는 광섬유 브래그 격자 어레이; 광섬유 브래그 격자 어레이로부터 반사된 각각의 광이 검출되는 시간을 측정하는 광섬유 격자 파장 감지부; 기준 파장 생성부로부터 측정된 신호를 이용해 파장 변화 정보를 파악하고 광섬유 격자 파장 감지부로부터 검출된 광 각각의 파장을 구하는 신호 처리부; 파장 가변 레이저에 사용되는 파장 가변 필터에 교류 전압과 직류 전압을 인가하는 레이저 파장 제어 피드백부를 포함한다. 또한 파장 가변 레이저 출력단에 무편광기, 또는 편광 스크램블러를 추가하여 센서 시스템의 편광 의존성을 제거할 수 있다. 본 발명을 적용함으로써 파장 안정성으로 인하여 측정의 정확성이 향상되고, 편광 의존성 문제를 해결하여 광섬유 브래그 격자 센서를 실용화함으로써 기존의 구조안전진단 센서들을 대체하는 효과가 있다.

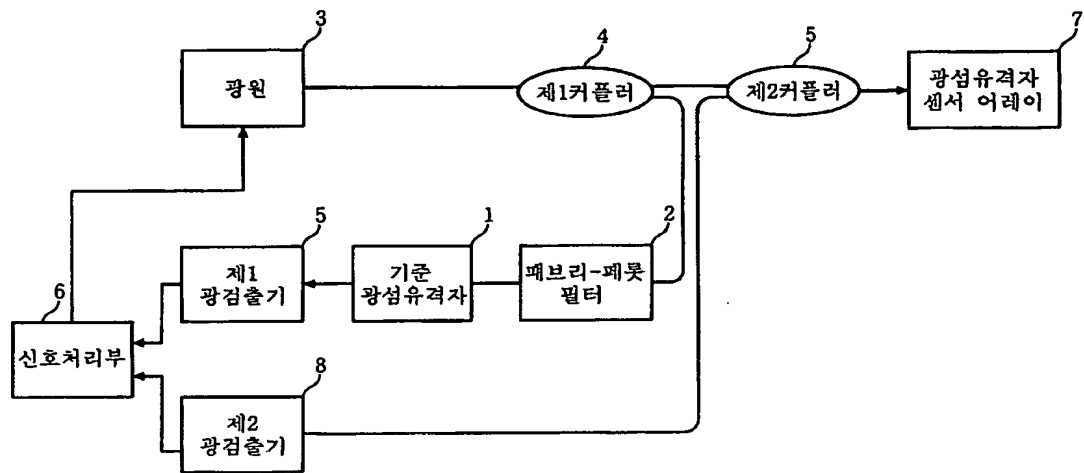
[Fig. 1]



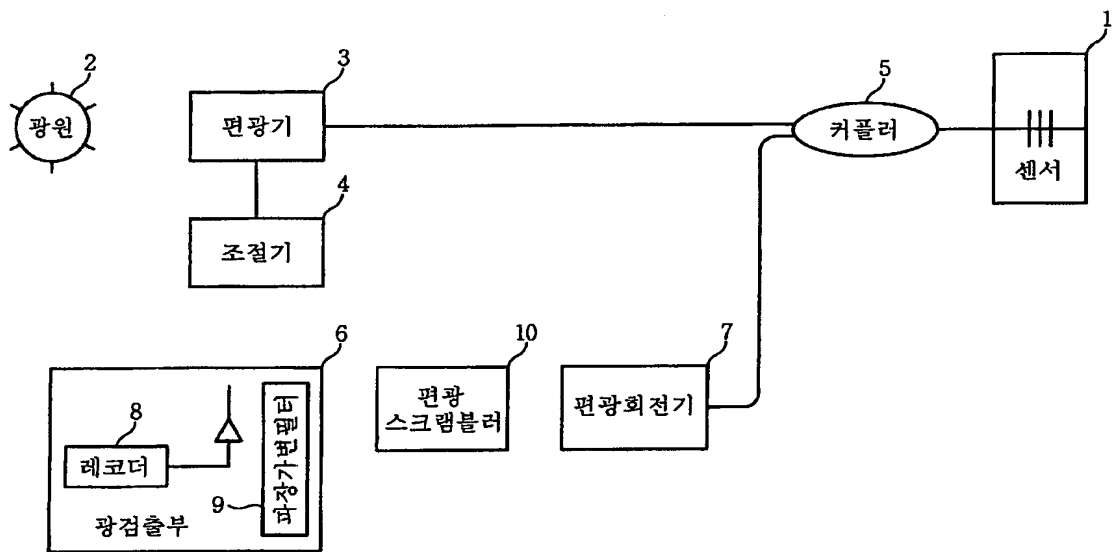
[Fig. 2]



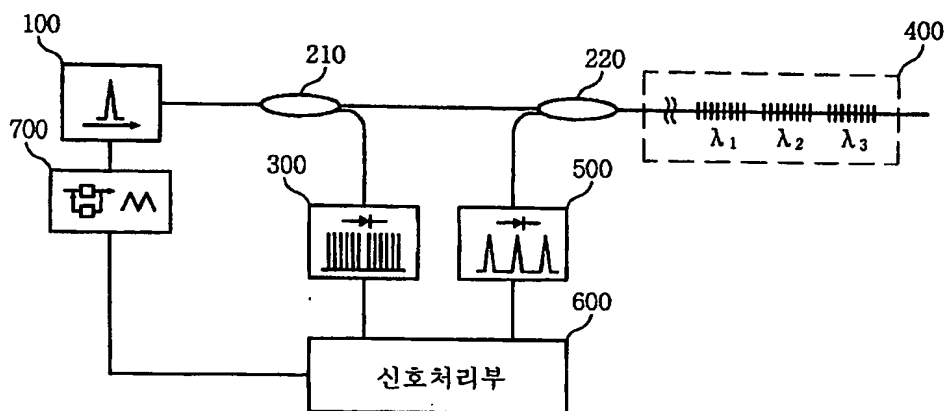
[Fig. 3]



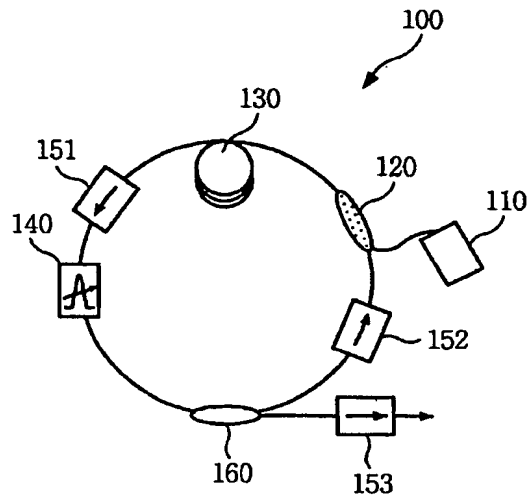
[Fig. 4]



[Fig. 5]

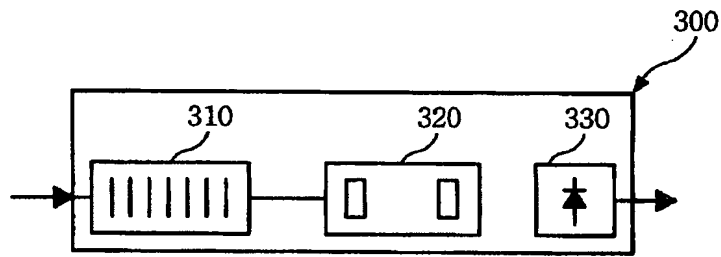


[Fig. 6]

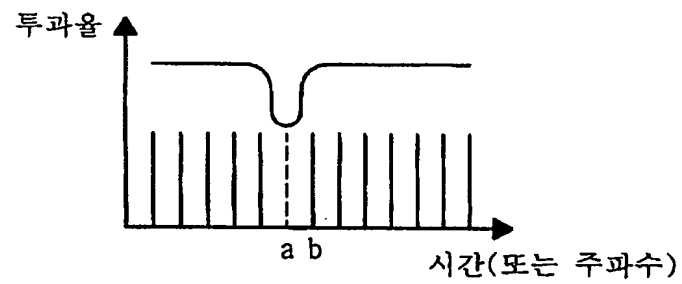


[Fig. 7]

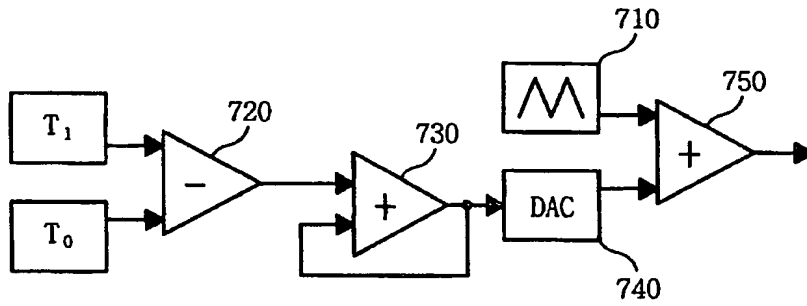
(1)



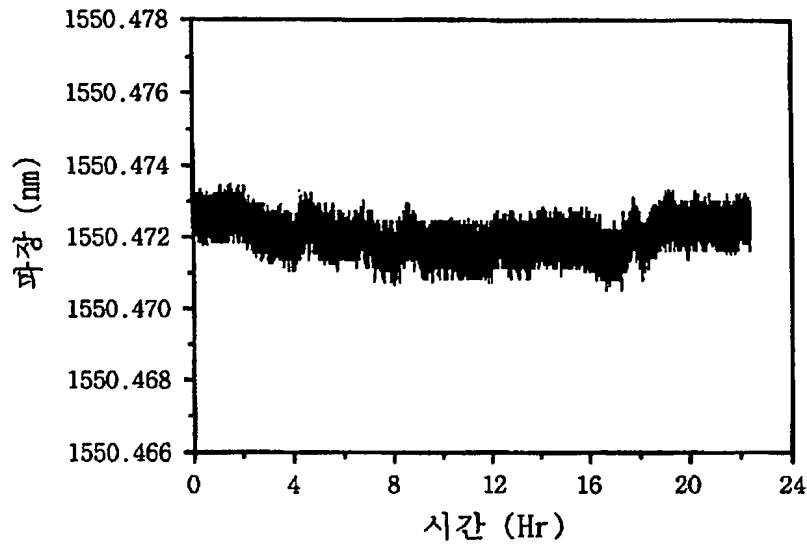
(2)



[Fig. 8]

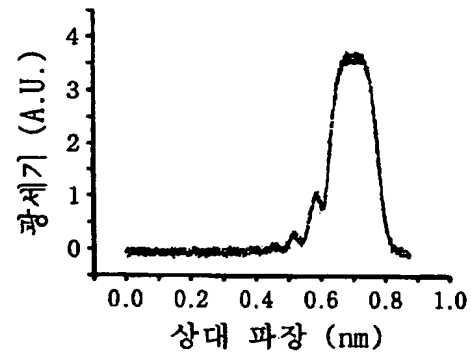


[Fig. 9]



[Fig. 10]

(1)



(2)

